

# Моделирование пространственной структуры полей термокарстовых озер криолитозоны Северной Евразии с учетом логнормального закона распределения их по размерам

Полищук В. Ю., Муратов И.Н., Полищук Ю.М.

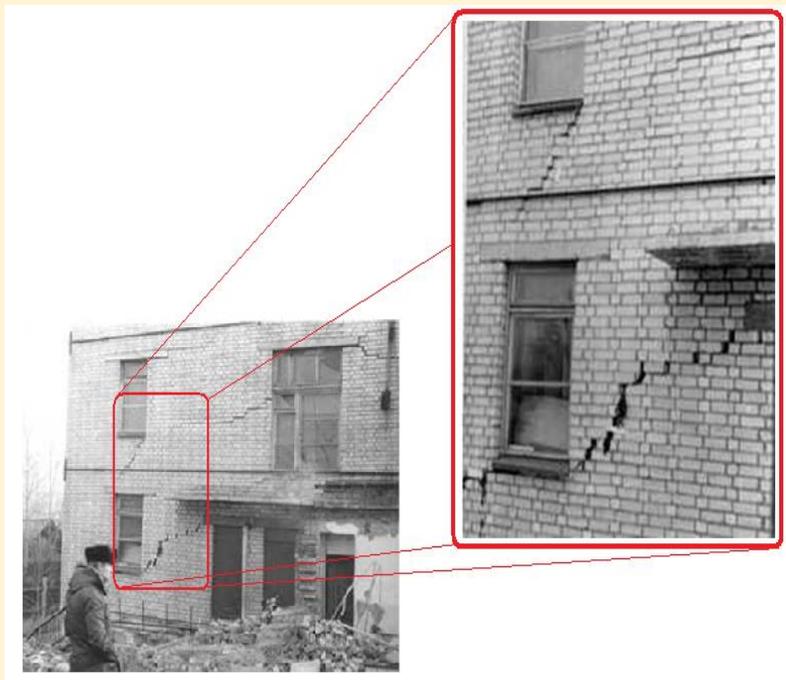
*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск*

*Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск*

# Карта-схема распространения вечной мерзлоты на территории России



# Нарушение зданий и сооружений



**Аварийная ситуация в здании детского сада (г. Чита), возникшая в результате оттаивания многолетней мерзлоты.**



Деформация железнодорожного полотна, вызванная мерзлотным пучением

# Поля термокарстовых озер

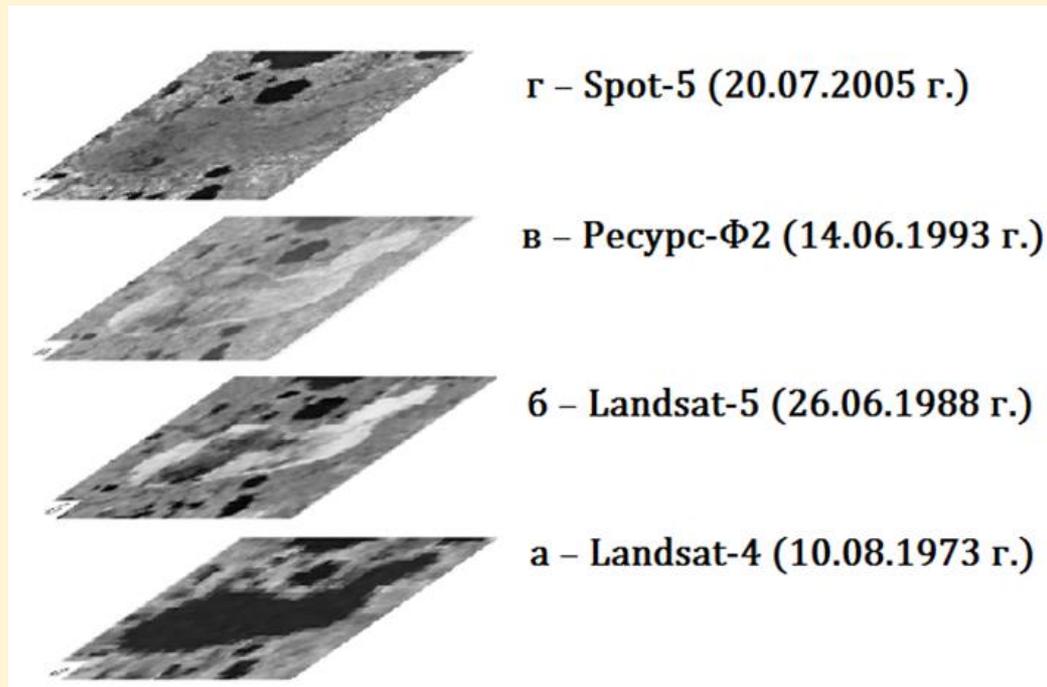


Обильные озера и водоемы в центральной части Надым-Пурского водораздела (Западная Сибирь, фото с вертолета, С. Кирпотин)

# Озера на спутниковых снимках



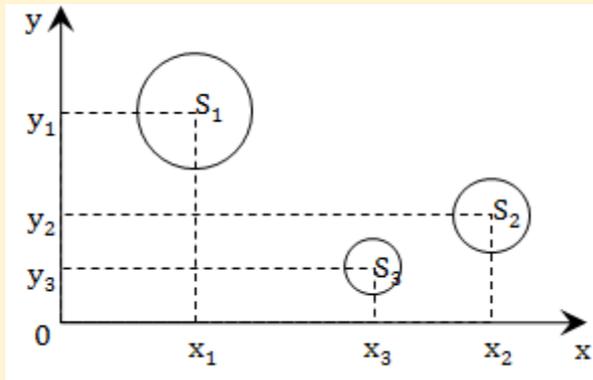
Изображения термокарстовых озер на космическом снимке *SPOT-5*, 07.07.2003



Фрагменты космических изображений с конечной стадией формирования осушенной котловины. Обозначено:  
а – Landsat-4 (10.08.1973 г.); б – Landsat-5 (26.06.1988 г.);  
в – Ресурс-Ф2 (14.06.1993 г.); г – Spot-5 (20.07.2005 г.)

# Геоимитационная модель динамики поля термокарстовых озер

Геометрическая интерпретация фрагмента математической модели поля термокарстовых озер в виде совокупности случайных окружностей



$$x_k = R * \cos \alpha + x,$$

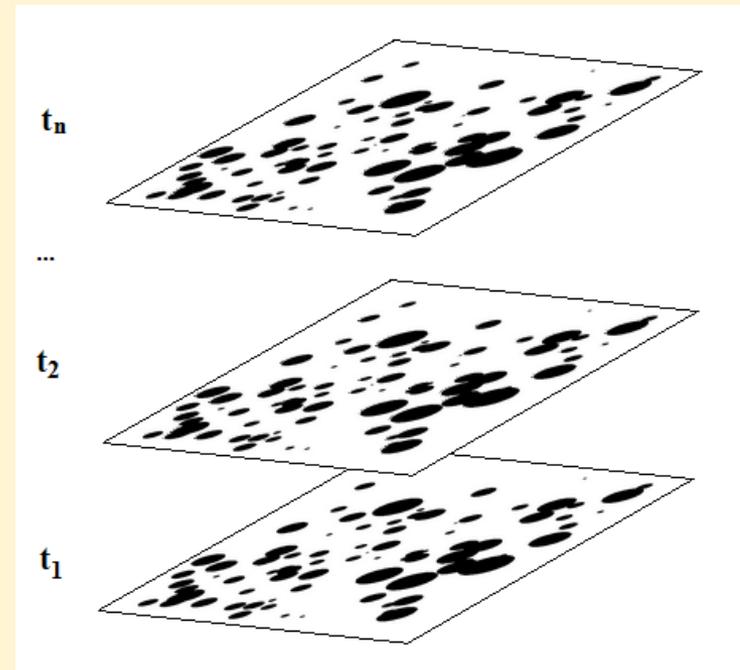
$$y_k = R * \sin \alpha + y,$$

где  $x$  и  $y$  - координаты центра окружности,  
 $x_k$  и  $y_k$  - координаты точки границы окружности,  
 $\alpha$  - значение угла между осью и радиусом,  
 $R$  - радиус окружности, рассчитанный по формуле

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

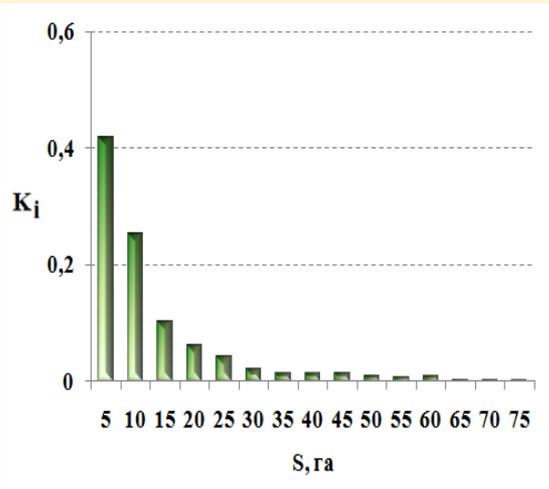
где  $S$  - случайная величина, распределенная по показательному закону, определяющая площадь окружности.

Визуальное представление модели динамики полей термокарстовых озер в виде слоев ГИС

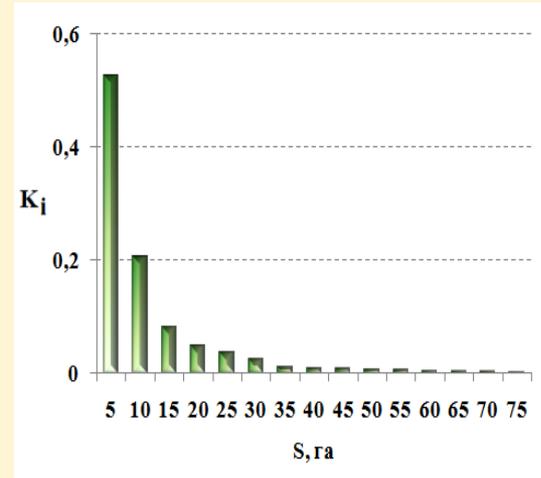


$t_i$  - время (год),  $i = \overline{1, n}$

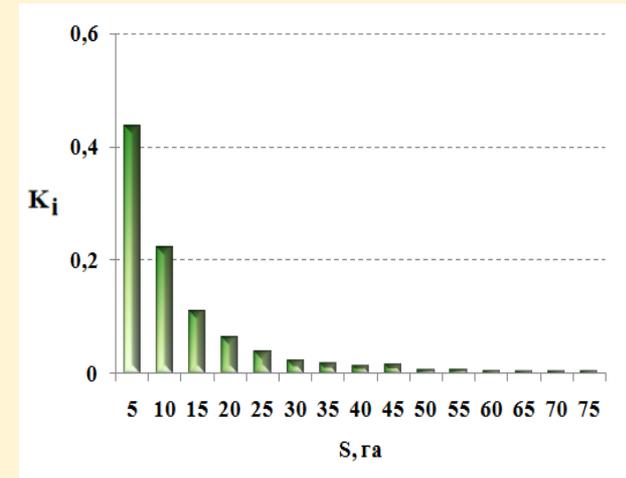
# Экспериментальные исследования распределения озер по площадям по снимкам среднего разрешения



В зоне островной мерзлоты



В зоне прерывистой мерзлоты



В зоне сплошной мерзлоты

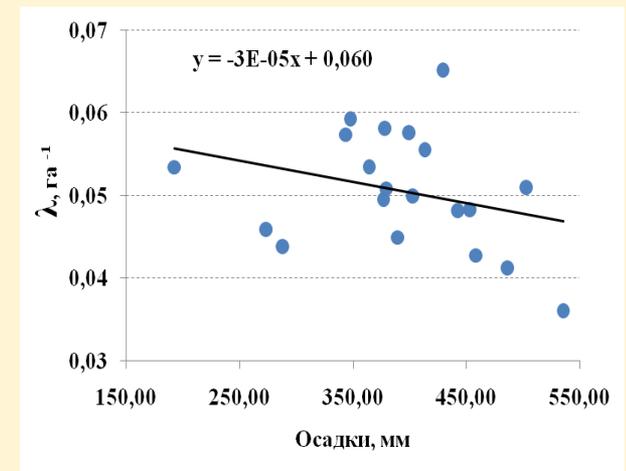
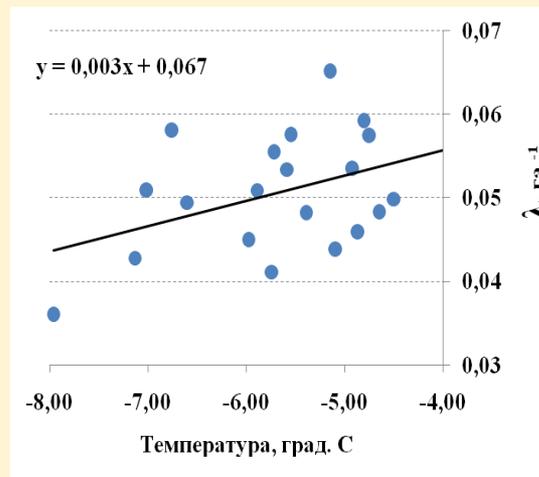
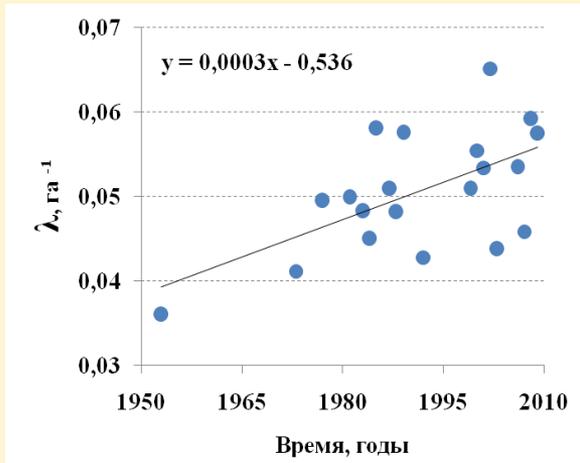
Во всех исследованных зонах экспериментальные гистограммы соответствуют (по критерию  $\chi^2$  с вероятностью в среднем 90%) теоретическому показательному (экспоненциальному) закону распределения озер по размерам

(площадям) в виде:  $f(s) = \lambda e^{-\lambda s}$ , математическое ожидание которого  $M(s) = \frac{1}{\lambda}$ .

Единственный параметр распределения  $\lambda$  может быть определен из экспериментальных данных в виде:

$$\lambda \cong \frac{1}{S_{cp}}, \text{ где } S_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad i = \overline{1, n}$$

# Зависимость значений параметра модели $\lambda$ от времени и климатических характеристик



Уравнение множественной регрессии:

$$\lambda = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3,$$

где  $X_1$  - время (годы);  $X_2$  - среднегодовая температура;  $X_3$  - годовая сумма осадков.

# Свойства геоимитационно-регрессионной модели динамики площадей озер

На основе результатов экспериментальных исследований для разработки модели динамики полей термокарстовых озер были приняты следующие положения:

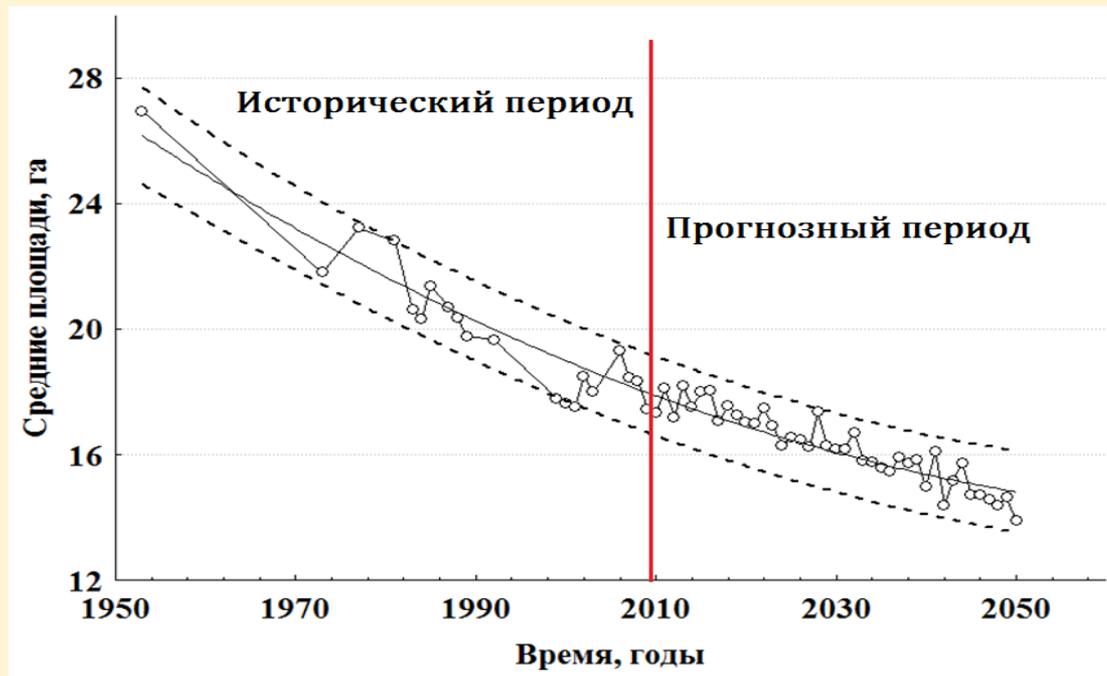
- *Форма озера – окружность.*
- *Закон распределения окружностей на плоскости – равномерный.*
- *Пространственные изменения Координат центров окружностей и их площадей статистически независимы.*
- *Распределение окружностей по размерам (size-distribution) соответствует экспоненциальному закону.*
- *Временные изменения модельного параметра  $\lambda$  зависят от климатических параметров и определяются регрессионным линейным уравнением.*

**Все положения основаны на экспериментальных данных**, полученных по спутниковым снимкам среднего разрешения Landsat – 1, 4, 5, 7 и по результатам реанализа метеоданных (ERA INTERIM and APHRODITE JMA).

# Пример прогноза динамики полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты до 2050 г.

Сценарий модельного (компьютерного) эксперимента: *Прогнозирование динамики площадей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на период до 2050 г. на основе учета линейного тренда изменения температуры в соответствии с моделью IPCC*

## Прогнозные оценки средних площадей термокарстовых озер



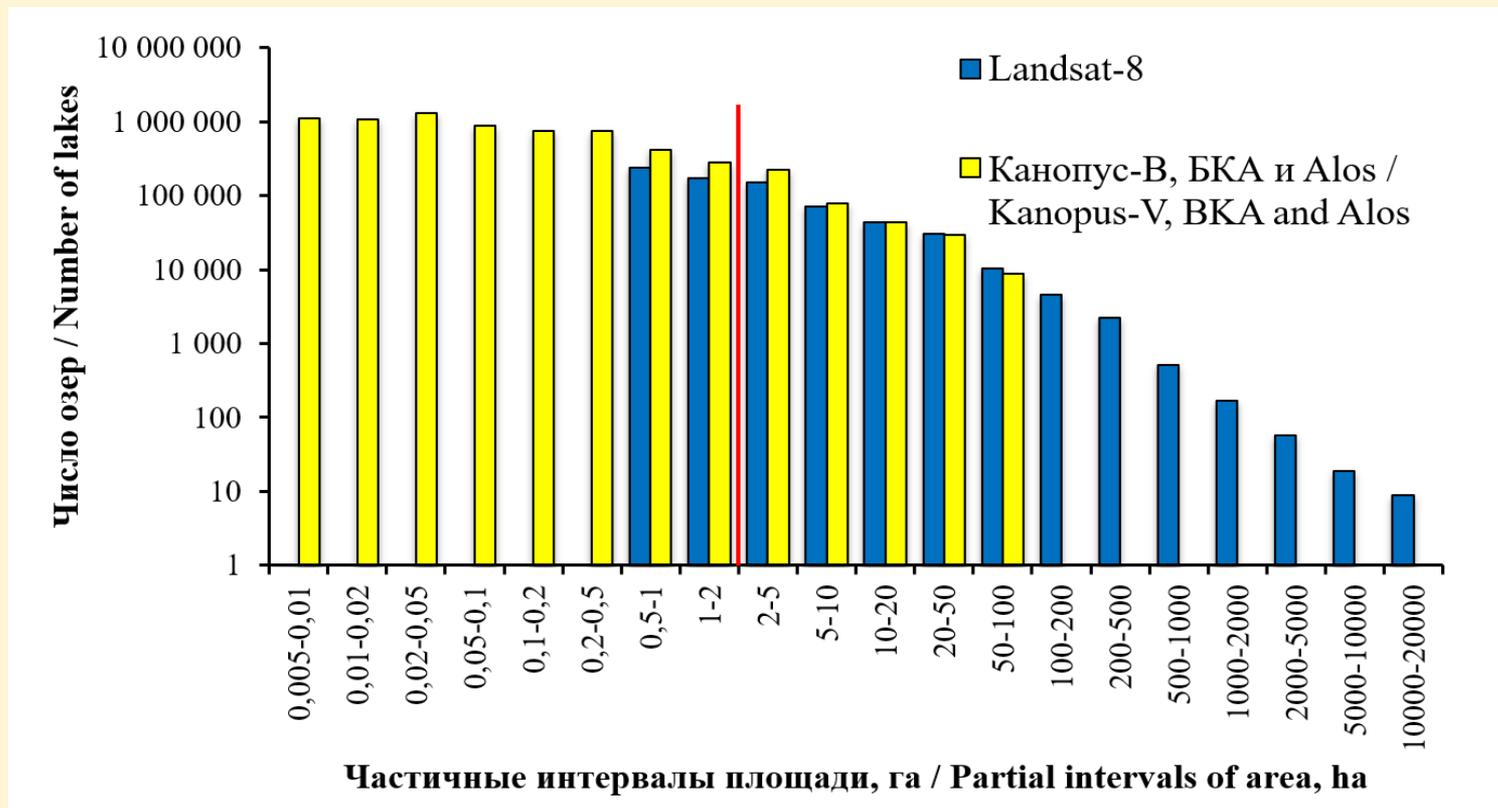
Заметим, что рост температуры в прогнозный период составляет  $2,28^{\circ}\text{C}$  к 2050 г. (согласно прогнозам В.В. Клименко для Западной Сибири).

# Учет малых озер как интенсивных генераторов природного метана

По недавним исследованиям (Pokrovsky et al., 2013; Holgerson&Raymonds, 2016), концентрация метана в малых озерах (менее 500 м<sup>2</sup>), превышает ее величину в больших озерах более чем в десять раз. Однако рассмотренная выше модель, основанная на данных со снимков Landsat (разрешение 30 м), не учитывает малые озера, которые не видны на снимках Landsat.

Для учета малых озер необходимо использовать снимки высокого разрешения (менее 1-2 м). Нам удалось разработать геоинформационную технологию интеграции данных со спутников среднего (СР) и высокого (ВР) разрешения, с использованием которой по снимкам Landsat (СР) и Канопус-В (ВР) была синтезирована единая гистограмма распределения озер по площадям, позволяющая определить вид закона распределения озер, учитывающего малые озера.

# Построение синтезированной гистограммы



**Иллюстрация совмещения графиков двух исходных гистограмм, полученных по снимкам среднего (синий) и высокого (желтый) разрешения.**

*Проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений показала, что по критерию Пирсона синтезированная гистограмма, полученная в широком диапазоне их размеров и учитывающая малые озера, соответствует логнормальному закону с вероятностью 0,99.*

# Логнормальный закон распределения

Плотность вероятности для логнормального закона распределения площади озер ( $s$ ) определяется уравнением:

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s\sigma}} \exp\left(-\frac{(\ln s - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $\mu$  - математическое ожидание,  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение.

В нашем случае оценки математического ожидания ( $M$ ) и дисперсии ( $D$ ) для логнормального распределения площадей озер Западной Сибири могут быть получены из выборочных данных в виде:

$$M = \sum_{i=1}^m (\ln s_i \times w_i), \quad (2)$$

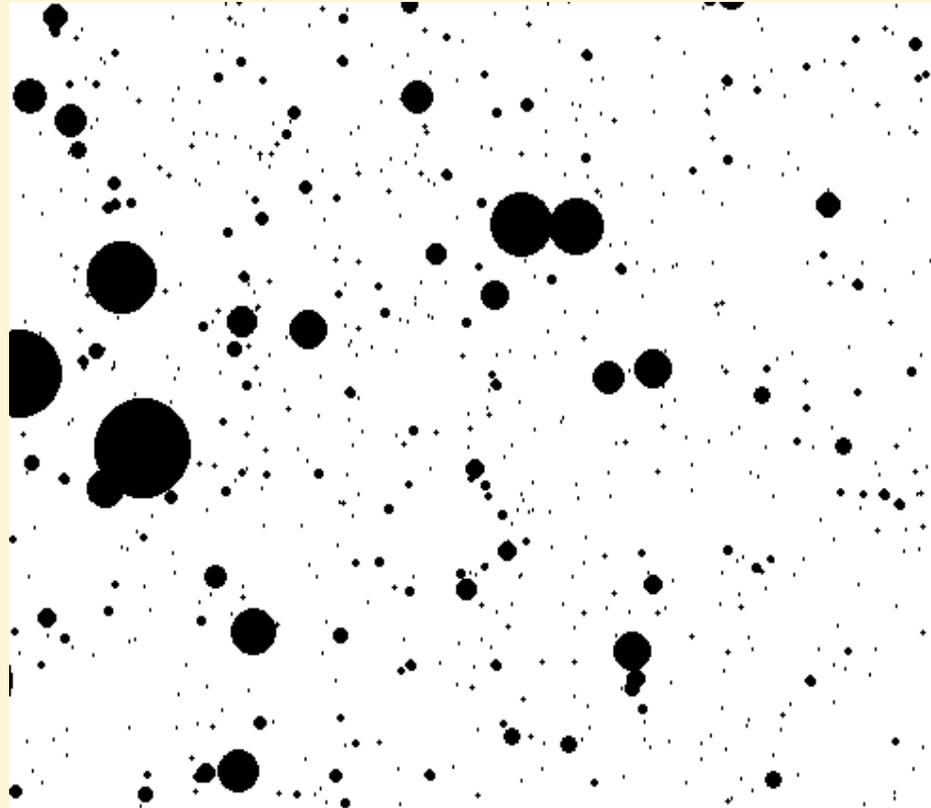
$$D = \sum_{i=1}^m ((\ln s_i)^2 \times w_i) - M^2, \quad (3)$$

где  $m$  - число частичных интервалов,  $i$  - номер интервала.

Используя полученные выше данные о численности и площадях озер в широком диапазоне их размеров и учитывая, что  $m = 20$ , по формулам (2) и (3) найдем:

$$M = 6,88 \text{ и } D = 3,42.$$

# Моделирование пространственной структуры поля озер с логнормальным распределением



Фрагмент модельного поля термокарстовых озёр, распределенных по логнормальному закону

# Заключение

Представленные результаты могут быть использованы для уточнения прогнозов динамики эмиссии метана из термокарстовых озер зоны мерзлоты Северной Евразии. Важность уточнения таких прогнозов в ближайшие десятилетия обусловлена необходимостью выполнения решений Парижского климатического Соглашения (2015 г).

Спасибо  
за  
внимание!